

تحلیل ترمودینامیکی و اقتصادی مقایسه‌ای سه پیکربندی مختلف بر پایه‌ی مبدل گرما به منظور بهبود تولید توان از منابع زمین‌گرمایی دما پایین

حسین صادقی گنبدانی
دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران، St_H.Sadeghi@Urmia.ac.ir

نادر مشیری آیدنلو
دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران، St_N.Moshiri@Urmia.ac.ir

ایرج میرزایی
استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران، I.Mirzaee@urmia.ac.ir

مرتضی خلیلیان*
استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران، M.Khalilian@urmia.ac.ir

صمد جعفرمدار
استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران، S.Jafarmadar@urmia.ac.ir

چکیده

افزایش تقاضای انرژی و ضرورت کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی، بهره‌گیری از منابع زمین‌گرمایی دما پایین را به‌عنوان یک گزینه پایدار و تجدیدپذیر با اهمیتی دوچندان مواجه ساخته است. در این پژوهش، یک سیستم ترکیبی شامل مبدل گرمای جذبی و چرخه رانکین آلی به‌منظور بهره‌برداری از منابع زمین‌گرمایی دما پایین برای تولید توان الکتریکی پیشنهاد شده است. این سیستم در سه پیکربندی مختلف طراحی و تحلیل شده است تا بهینه‌ترین ساختار برای تولید توان پایدار الکتریکی از این منابع شناسایی شود. به‌منظور دستیابی به این هدف، عملکرد سیستم‌های پیشنهادی از منظر تحلیل‌های انرژی، انرژی و اقتصادی مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج حاصل نشان می‌دهد که پیکربندی سوم با هزینه چرخه عمر ۱۴/۳۷ میلیون دلار قادر است توان ۲/۵ مگاواتی تأمین کند و بازده انرژی و انرژی آن به ترتیب ۸۳٪ و ۵۱٪ است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که سیستم ترکیبی پیشنهادی، گزینه‌ای کارآمد برای بهره‌برداری از منابع زمین‌گرمایی دما پایین و تولید برق پایدار است. این سیستم با بهینه‌سازی اجزای کلیدی، می‌تواند کارایی را بهبود داده و هزینه‌ها را کاهش دهد و در توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر نقش مؤثری ایفا کند.

واژه‌های کلیدی: انرژی زمین‌گرمایی دما پایین، مبدل گرمای جذبی، چرخه رانکین آلی، سیستم ترکیبی، ارزیابی ترمودینامیکی، ارزیابی اقتصادی.

Comparative Thermodynamic and Economic Analysis of Three Different Configurations Based on Heat Transformer for Enhanced Power Generation from Low-Temperature Geothermal Resources

H. S. Gonbadani
N. M. Aydenlou
I. Mirzaei
M. Khalilian
S. Jafarmadar

Department of Mechanical Engineering, Urmia university, Urmia, Iran
Department of Mechanical Engineering, Urmia university, Urmia, Iran
Department of Mechanical Engineering, Urmia university, Urmia, Iran
Department of Mechanical Engineering, Urmia university, Urmia, Iran
Department of Mechanical Engineering, Urmia university, Urmia, Iran

Abstract

The increasing demand for energy and the need to reduce environmental pollution have highlighted the significance of utilizing low-temperature geothermal resources as a sustainable and renewable option. In this study, a hybrid system comprising an absorption heat transformer and an organic Rankine cycle is introduced to optimize the use of these resources for power generation. Three different configurations of the system have been designed and evaluated to identify the most efficient structure. The results of energy, exergy, and economic analyses indicate that the third configuration, with a lifecycle cost of \$14.37 million, is capable of generating 2.5 MW of electrical power, achieving energy and exergy efficiencies of 8.83% and 51.2%, respectively. Moreover, thermodynamic and economic assessments reveal that the temperatures of key components, such as the evaporator, generator, and turbine, significantly impact system performance, and their optimization can enhance efficiency and reduce costs. The findings of this study demonstrate that the proposed hybrid system is an effective solution for harnessing low-temperature geothermal resources and generating sustainable electricity, contributing to the advancement of renewable energy development.

Keywords: Low-temperature geothermal energy, Absorption heat transformer, Organic Rankine cycle, Thermodynamic assessment, Economic evaluation.

کاربردهایی مانند گرمایش، شیرین‌سازی آب و تولید برق مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲،۳].

منابع زمین‌گرمایی با دمای پایین (کمتر از ۱۵۰°C) به دلیل پراکندگی مناسب، امکان تولید برق پایدار در مقیاس محلی و منطقه‌ای را فراهم می‌کنند؛ اما بازده پایین چرخه‌های تولید توان در این دماها، نیازمند به‌کارگیری فناوری‌های ارتقای حرارتی است [۵-۳].

۱- مقدمه

افزایش روزافزون تقاضای جهانی برای انرژی، همراه با نگرانی‌های زیست‌محیطی ناشی از مصرف سوخت‌های فسیلی، ضرورت بهره‌گیری از منابع انرژی تجدیدپذیر را بیش از پیش آشکار ساخته است [۱]. در این میان، انرژی زمین‌گرمایی به‌عنوان منبعی پایدار و در دسترس، در

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: M.Khalilian@urmia.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۳/۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۳/۳۰

یکی از رویکردهای نوآورانه در این زمینه، استفاده از مبدل‌های گرمای جذبی جهت افزایش دمای گرمای ورودی به چرخه‌های تولید توان است. ترکیب این مبدل‌ها با چرخه رانکین آلی می‌تواند بازده انرژی و انرژی سیستم را افزایش داده و هزینه‌های بهره‌برداری را کاهش دهد [۶]. در این پژوهش، سه پیکربندی ترکیبی از مبدل گرمای جذبی و چرخه رانکین آلی برای بهره‌برداری از منابع زمین‌گرمایی دمای پایین ارائه و از جنبه‌های انرژی، انرژی و اقتصادی ارزیابی شده‌اند.

۲- پیشینه تحقیق

منابع زمین‌گرمایی دما پایین به دلیل پایداری، دسترسی گسترده و سازگاری با محیط‌زیست، به‌عنوان یکی از گزینه‌های مهم در تأمین انرژی پایدار مطرح شده‌اند. با این حال، پایین بودن دمای منبع سبب کاهش بازده چرخه‌های تولید توان و ایجاد محدودیت‌های ترمودینامیکی می‌شود؛ بنابراین، عملکرد این سامانه‌ها به انتخاب چرخه مناسب و شرایط بهره‌برداری وابسته است [۷-۹].

برای بهره‌برداری از منابع زمین‌گرمایی دما پایین، چرخه‌های ترمودینامیکی متعددی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در این میان، چرخه رانکین آلی به‌دلیل ساختار ساده، هزینه سرمایه‌گذاری کمتر و سازگاری مناسب با دماهای پایین، عملکرد مطلوبی نشان داده است. مطالعاتی مانند کار امبریز-دیز و همکاران [۱۰] و حمله‌دار و همکاران [۴] نشان می‌دهد که این چرخه از نظر انرژی و اقتصادی کارآمد بوده و می‌تواند با منابع تجدیدپذیر دیگر نیز ترکیب شود. با این حال، محدودیت دمای منبع ورودی همچنان موجب اتلاف قابل توجه انرژی و کاهش بازده می‌گردد [۱۱، ۱۲].

مبدل گرمای جذبی به‌عنوان رویکردی برای ارتقای دمای منابع حرارتی دما پایین، بدون نیاز به مصرف قابل‌توجه انرژی الکتریکی یا مکانیکی به کار می‌رود و معمولاً با زوج سیال لیتیوم‌بروماید-آب عمل می‌کند. این سامانه در بازیابی و افزایش دمای گرمای اتلافی در فرآیندهای صنعتی و نیز در سامانه‌های خورشیدی و زمین‌گرمایی مورد استفاده قرار گرفته است.

مطالعات اولیه نشان داده‌اند که اجزای جاذب و مولد بیشترین سهم را در برگشت‌ناپذیری و افت بازده سامانه دارند و بهینه‌سازی شرایط عملکردی این بخش‌ها برای افزایش بازده انرژی و انرژی ضروری است [۱۳، ۱۴].

همچنین، پژوهش‌هایی که ادغام این فناوری با چرخه‌های قدرت را بررسی کرده‌اند، مانند فو و همکاران [۱۵]، بهبود دما و بازده گرمایی را گزارش کرده‌اند. بهنام و همکاران [۱۶] و زارع و همکاران [۱۷] نیز نشان داده‌اند که استفاده از این فناوری در سامانه‌های تولید هم‌زمان برق، گرما و آب شیرین می‌تواند کارایی کل سیستم را افزایش دهد. از منظر اقتصادی نیز نتایج نشان داده‌اند که تنظیم دمای اجزای کلیدی سامانه می‌تواند بازده اقتصادی را بهبود داده و دوره بازگشت سرمایه را کاهش دهد [۱۸، ۱۹]. همچنین، به‌کارگیری کلکتورهای پیشرفته در این سامانه‌ها به افزایش قابل‌توجه بازده انرژی منجر شده است [۲۰].

در حوزه تحلیل انرژی پیشرفته، مهرجویی و همکاران [۲۱]

نشان دادند که تنها بخش محدودی از تخریب انرژی در یک مبدل گرمای جذبی دوگانه (حدود ۱۶٪) قابل اجتناب است، که بیانگر محدودیت‌های ذاتی بهینه‌سازی در برخی شرایط عملیاتی است. در مقابل، مطالعاتی مانند پژوهش بنیوال و همکاران [۲۲] با طراحی ساختارهای ترکیبی نوآورانه توانسته‌اند بازده و بهره‌وری سامانه‌های گرمایی را به‌طور معناداری افزایش دهند. همچنین، ادغام این فناوری با چرخه‌های قدرت نیز نتایج مثبتی داشته است؛ به‌طور مثال، نعمت‌زاده و همکاران [۲۳] نشان دادند که ترکیب چرخه کالینا با سامانه جذبی می‌تواند کارایی الکتریکی منابع زمین‌گرمایی دما پایین را بهبود دهد.

به‌طور کلی، اگرچه عملکرد انرژی، انرژی و اقتصادی این فناوری در مطالعات مختلف تأیید شده است، اما بیشتر تحقیقات تنها یک پیکربندی را بررسی کرده‌اند. از این رو، مقایسه جامع چند ساختار مختلف از تلفیق چرخه رانکین آلی و مبدل گرمای جذبی برای بهره‌برداری مؤثر از منابع زمین‌گرمایی دما پایین ضروری است. پژوهش حاضر با هدف پر کردن این خلأ، سه پیکربندی متفاوت این ترکیب را از نظر انرژی، انرژی و اقتصادی مورد تحلیل و ارزیابی قرار می‌دهد.

۳- توصیف سیستم پیشنهادی

سیستم پیشنهادی این پژوهش شامل سه بخش اصلی است: منبع زمین‌گرمایی، مبدل گرمای جذبی و چرخه رانکین آلی که با هدف افزایش کارایی منابع زمین‌گرمایی دما پایین در تولید برق طراحی شده است.

در این سیستم، گرمای استخراج‌شده از منبع زمین‌گرمایی ابتدا به تبخیرکن و ژنراتور مبدل گرمای جذبی منتقل می‌شود. سپس، باقی‌مانده گرمای سیال زمین‌گرمایی در اکونومایزر چرخه رانکین آلی برای پیش‌گرمایش سیال آلی قبل از ورود به جاذب مورد استفاده قرار می‌گیرد. پس از عبور از اکونومایزر، سیال آلی به جاذب مبدل گرمای جذبی هدایت شده و گرمای تقویت‌شده را دریافت می‌کند. در ادامه، بخار سیال آلی پس از دریافت گرما، به سمت توربین هدایت شده و تولید توان الکتریکی انجام می‌شود. در این پژوهش، سه پیکربندی متفاوت برای ادغام مبدل گرمای جذبی با چرخه رانکین آلی ارائه شده است. تفاوت اصلی این پیکربندی‌ها که در شکل ۱ نشان داده شده‌اند در ترتیب و نحوه انتقال گرما بین ژنراتور، تبخیرکن و سیال زمین‌گرمایی است.

۴- مدل‌سازی سیستم پیشنهادی

مدل‌سازی سیستم ترکیبی از منظر تحلیل انرژی، انرژی و هزینه چرخه عمر، با استفاده از نرم‌افزار حلگر معادلات مهندسی (EES) انجام شده است. در این مدل‌سازی، به‌منظور ساده‌سازی تحلیل‌های ترمودینامیکی، فرضیات زیر در نظر گرفته شده است [۱۶، ۲۴]:

- ✓ سیستم و اجزای آن در شرایط پایا کار می‌کنند.
- ✓ دمای محیط برابر با ۲۵ درجه سلسیوس و فشار محیطی معادل ۱۰۱/۳ کیلوپاسکال در نظر گرفته شده است.
- ✓ سیال زمین‌گرمایی، آب فرض شده و کار مورد نیاز برای پمپ کردن آن نادیده گرفته شده است.
- ✓ اتلاف گرما در اجزای سیستم ناچیز فرض شده است.
- ✓ تأثیر تغییرات انرژی جنبشی و پتانسیل در تحلیل‌ها لحاظ نشده است.

لیتیوم بروماید-آب را نشان می‌دهند. از سوی دیگر، مجموع انرژی‌های ورودی، خروجی و ذخیره‌شده در سیستم ثابت باقی می‌ماند و انرژی فقط از یک شکل به شکل دیگر تبدیل می‌شود. این اصل به شکل زیر به حجم کنترل اعمال می‌شود:

$$\dot{Q} - \dot{W}_{cv} = \sum \dot{m}_e(h_e) - \sum \dot{m}_i(h_i) \quad (3)$$

۲-۴- تحلیل انرژی

موازنه‌ی انرژی در تحلیل‌های ترمودینامیکی به منظور ارزیابی بهره‌وری واقعی سیستم‌ها به کار می‌رود. برخلاف موازنه‌ی انرژی که تنها مقدار انرژی را در نظر می‌گیرد، تحلیل انرژی کیفیت انرژی و قابلیت انجام کار مفید را بررسی می‌کند. این تحلیل به شناسایی تلفات انرژی، بهینه‌سازی فرایندها و کاهش بازگشت‌ناپذیری سیستم‌ها کمک می‌کند. مقدار انرژی نابود شده در سیستم از ترکیب انرژی گرمایی، کار، و جریان ورودی و خروجی سیال محاسبه می‌شود [۲۸،۲۹]. همچنین، انرژی جریان سیال شامل انرژی فیزیکی و شیمیایی است که بیانگر توانایی ماده در تولید کار است. پالاسیوس و همکاران [۳۰] روشی دقیق برای محاسبه‌ی انرژی شیمیایی محلول لیتیوم بروماید ارائه داده‌اند که با استفاده از نسبت جرمی لیتیوم بروماید مقدار آن را پیش‌بینی می‌کند:

$$\dot{E}x_D = \sum_j \left(1 - \frac{T_0}{T_j}\right) \dot{Q}_j - \dot{W}_{cv} + \sum_i (\dot{E}x_i) - \sum_e (\dot{E}x_e) \quad (4)$$

$$\dot{E}x_i = \dot{E}x_{ph,i} + \dot{E}x_{ch,i} \quad (5)$$

$$\dot{E}x_{ph,i} = \dot{m}_i((h_i - h_0) - T_0(s_i - s_0)) \quad (6)$$

$$\begin{aligned} ex_{ch(LiBr-H_2O)} = & 49.1543936 + 511.273508X_{LiBr} + \\ & 621.193091X_{LiBr}^2 - 807.615485X_{LiBr}^3 + \\ & 1231.51214X_{LiBr}^4 \end{aligned} \quad (7)$$

۳-۴- مدل اقتصادی

در تصمیم‌گیری‌های سرمایه‌گذاری برای سیستم‌ها، علاوه بر تحلیل‌های ترمودینامیکی که به بهبود عملکرد و بهره‌وری انرژی کمک می‌کنند، در نظر گرفتن هزینه‌های کلی مرتبط با چرخه عمر سیستم نیز ضروری است. تحلیل هزینه‌ی چرخه‌ی عمر (LCC) روشی برای ارزیابی کل هزینه‌های یک سیستم از سرمایه‌گذاری اولیه تا بهره‌برداری، نگهداری و دفع است [۳۱]. این روش در اقتصاد انرژی اهمیت زیادی

- ✓ میرد (آب) در خروجی خنک‌کن و تبخیرکن در شرایط اشباع قرار دارد.
- ✓ محلول‌های لیتیوم بروماید در ژنراتور و جاذب، در فشار و دمای تعادلی قرار دارند.
- ✓ محلول‌های غلیظ و رقیق خروجی از ژنراتور و جاذب در حالت اشباع فرض شده‌اند.
- ✓ افت فشار در خطوط لوله و اجزای سیستم (به‌جز شیرهای انبساط) نادیده گرفته شده است.
- ✓ اختلاف دمای بین جاذب و بخار آلی تولیدی برابر با ۵ درجه سلسیوس در نظر گرفته شده است.
- ✓ آنتالپی در شیر انبساط ثابت فرض شده است.
- ✓ پارامترهای استفاده شده برای حالت پایه‌ی سیستم ترکیبی در جدول ۱ آمده‌اند.

جدول ۱- پارامترهای ورودی استفاده شده برای شبیه‌سازی سیستم [۲۵،۲۶].

پارامتر	اندازه (واحد)
دمای منبع زمین گرمایی T_G	110 (°C)
فشار سیال زمین گرمایی P_G	700 (kPa)
دبی منبع زمین گرمایی $\dot{m}_G$	150 ($\frac{kg}{s}$)
بازده آیزنتروپیک پمپ η_p	0.90 (-)
بازده آیزنتروپیک توربین η_T	0.87 (-)
ضریب عملکرد اکونومايزر $\varepsilon_{Eco,AHT}$	0.80 (-)
حداقل اختلاف دمای مجاز مبادله‌کن‌های گرمایی	5 (°C)
ΔT_{min}	

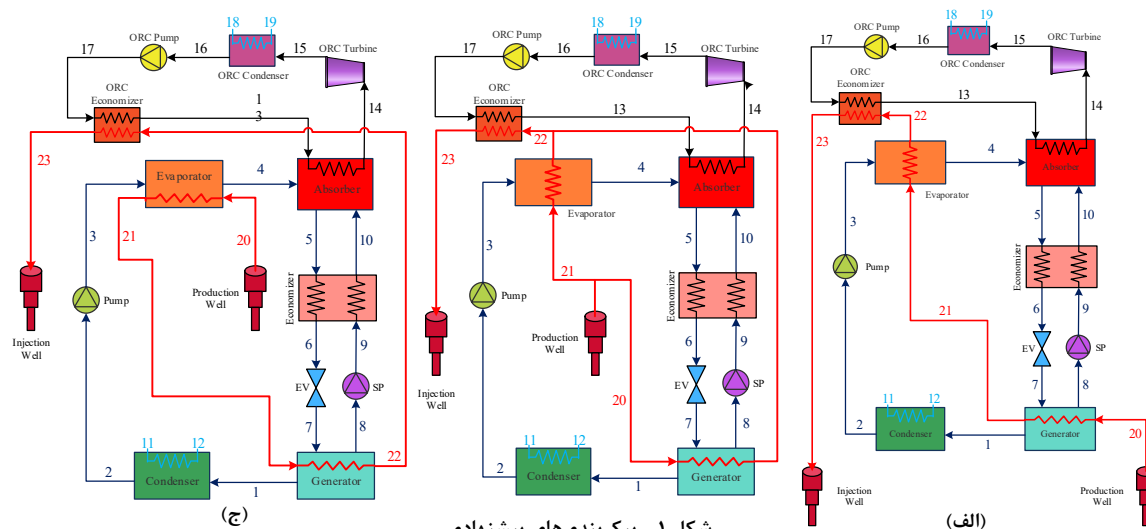
۱-۴- تحلیل جرم و انرژی

در تحلیل ترمودینامیکی، اصل بقای جرم و انرژی حائز اهمیت است. در شرایط پایا، جرم تنها بین اجزای سیستم جابه‌جا شده و میزان ورودی و خروجی آن برابر است. در اجزایی مانند جاذب و ژنراتور، علاوه بر موازنه‌ی کلی جرم، ثابت ماندن مقدار کل لیتیوم بروماید نیز ضروری است [۲۷]:

$$\sum \dot{m}_i = \sum \dot{m}_e \quad (1)$$

$$\sum \dot{m}_i X_i = \sum \dot{m}_e X_e \quad (2)$$

که در آن $\dot{m}$ و X به ترتیب دبی جرمی و غلظت جرمی محلول



شکل ۱- پیکربندی‌های پیشنهادی.

دارد، زیرا تصمیمات سرمایه‌گذاری باید علاوه بر هزینه‌های اولیه، مزایای اقتصادی و زیست‌محیطی بلندمدت را نیز شامل شوند. در این تحلیل، دو پارامتر کلیدی P_1 و P_2 برای ارزیابی مالی سیستم تعریف شده‌اند که با توابع P_1F و P_2F محاسبه می‌شوند.

• تابع P_1F میزان ارزش فعلی سرمایه‌گذاری را تعیین کرده و شامل متغیرهایی نظیر نرخ تورم، نرخ تخفیف بازار و مالیات بر درآمد است.

• تابع P_2F نیز پارامتر اقتصادی P_2 را محاسبه می‌کند که برای ارزیابی مالی دقیق‌تر سیستم ضروری است. این توابع در نرم‌افزار EES وجود داشته و نیازی به انجام محاسبات دستی نیست. مقادیر این پارامترها به کمک داده‌های جدول ۲ و به‌صورت زیر تعیین می‌شوند [۳۱]:

$$P_1 = P_1f(SL, GI, MD, CF, IT) \quad (۸)$$

$$P_2 = P_2f(CF, MD, DD, GI, ER, MI, SL, PM, DL, PT, SV, IT, RA) \quad (۹)$$

با در دست داشتن مقادیر پارامترهای اقتصادی، هزینه چرخه عمر سیستم با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$LCC = P_1 \times Z_{f,LCC} + P_2 \times Z_{total} + Z_{ins} \quad (۱۰)$$

در تحلیل اقتصادی نیروگاه‌های زمین‌گرمایی، هزینه حفاری چاه یکی از مهم‌ترین هزینه‌ها محسوب می‌شود، زیرا این نیروگاه‌ها فاقد هزینه سوخت هستند و هزینه حفاری می‌تواند بسته به شرایط هر پروژه متغیر باشد. علاوه بر این، هزینه نصب و احداث نیروگاه معمولاً معادل ۲۵٪ از کل هزینه تجهیزات در نظر گرفته می‌شود. همچنین برای دقت بیشتر، هزینه خرید دستگاه‌ها با استفاده از شاخص هزینه مهندسی شیمی (CEPCI) به‌روزرسانی می‌شود:

$$Z_{total} = Z_{Well} + Z_{Gen} + Z_{Eva} + Z_{Abs} + Z_{RP,AHT} + Z_{SP,AHT} + Z_{EV} + Z_{P,ORC} + Z_T + Z_{Cond,AHT} + Z_{Cond,ORC} + Z_{Eco,AHT} + Z_{Eco,ORC} \quad (۱۱)$$

$$Z_{py} = Z_{org} \times \frac{CEPCI_{py}}{CEPCI_{org}} \quad (۱۲)$$

مقادیر سطح انتقال گرمای مورد نیاز برای محاسبه هزینه مبادله‌کن‌های گرمایی، با استفاده از معادلات انتقال گرما و اختلاف دمای میانگین لگاریتمی محاسبه می‌شود:

$$Q_{HEX} = U_{HEX} \Delta T_{LMTD} A_{HEX} \quad (۱۳)$$

$$\Delta T_{LMTD} = \frac{(T_{h,in} - T_{c,out}) - (T_{h,out} - T_{c,in})}{\ln \left(\frac{T_{h,in} - T_{c,out}}{T_{h,out} - T_{c,in}} \right)} \quad (۱۴)$$

جدول ۲- داده‌های مورد نیاز برای محاسبه پارامترهای اقتصادی [۳۱].

مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر
0	CF	20	SL (yr)
0.04	MD	10	DL (yr)
0.2	DD	10	PM (yr)
0.045	F	0.01	MI
0.035	GI	0.035	PT
0.065	ER	0	SV
0.35	IT	1	RA

۴-۴- پارامترهای ارزیابی عملکرد

سیستم پیشنهادی در این پژوهش به‌منظور تولید توان الکتریکی از منابع زمین‌گرمایی دما پایین طراحی شده است. برای تحلیل عملکرد این سیستم، پارامترهای زیر مورد بررسی قرار می‌گیرند:

- بازده انرژی و انرژی تولید توان
 - ضریب عملکرد انرژی و انرژی چرخه مبدل گرمای جذبی
 - هزینه چرخه عمر سیستم
- معادلات ارائه‌شده در ادامه، روش محاسبه هر یک از این پارامترها را مشخص می‌کنند.

$$\dot{W}_{Net}^{Sys} = \dot{W}_T - (\dot{W}_{RP,AHT} + \dot{W}_{SP,AHT} + \dot{W}_{P,ORC}) \quad (۱۵)$$

$$\dot{Q}_{in}^{Sys} = \dot{m}_G (h_{20} - h_{23}) \quad (۱۶)$$

$$\eta_I^{Sys} = \frac{\dot{W}_{Net}^{Sys}}{\dot{Q}_{in}^{Sys}} \quad (۱۷)$$

$$\dot{E}x_{in}^{Sys} = \dot{E}x_{20} - \dot{E}x_{23} \quad (۱۸)$$

$$\eta_{II}^{Sys} = \frac{\dot{W}_{Net}^{Sys}}{\dot{E}x_{in}^{Sys}} \quad (۱۹)$$

$$COP_{AHT} = \frac{\dot{m}_{13}(h_{14} - h_{13})}{\dot{m}_G(h_{20} - h_{22})} \quad (۲۰)$$

$$ECOP_{AHT} = \frac{\dot{E}x_{20} - \dot{E}x_{22}}{\dot{E}x_{14} - \dot{E}x_{13}} \quad (۲۱)$$

$$\eta_I^{ORC} = \frac{\dot{W}_T - \dot{W}_{P,ORC}}{\dot{m}_{13}(h_{14} - h_{17})} \quad (۲۲)$$

$$\eta_{II}^{ORC} = \frac{\dot{W}_T - \dot{W}_{P,ORC}}{\dot{E}x_{14} - \dot{E}x_{17}} \quad (۲۳)$$

جدول ۳- توابع محاسبه هزینه اجزای نیروگاه [۲۳،۳۲].

شماره‌ی معادله	تابع هزینه	نام دستگاه
(۲۴)	$Z_{Gen} = 17500 \times \left(\frac{A_{Gen}}{100} \right)^{0.6}$	ژنراتور
(۲۵)	$Z_{Abs} = 16500 \times \left(\frac{A_{Abs}}{100} \right)^{0.6}$	جاذب
(۲۶)	$Z_{Eva} = 16000 \times \left(\frac{A_{Eva}}{100} \right)^{0.6}$	تبخیرکن
(۲۷)	$Z_T = 4405 \times (\dot{W}_T)^{0.7}$	توربین
(۲۸)	$Z_P = 3540 \times (\dot{W}_P)^{0.71}$	پمپ
(۲۹)	$Z_{Cond} = 8000 \times \left(\frac{A_{Cond}}{100} \right)^{0.6}$	چگالنده
(۳۰)	$Z_{Eco} = 12000 \times \left(\frac{A_{Eco}}{100} \right)^{0.6}$	اکونومایزر
(۳۱)	$Z_{EV} = 114.5 \times \dot{m}_6$	شیر خفایش
(۳۲)	$Z_{Well} = (1.72 \times 10^{-7} \cdot MD^2 + 2.3 \times 10^{-3} \cdot MD - 0.62) \times 10^6$	چاه زمین‌گرمایی

۵- نتایج

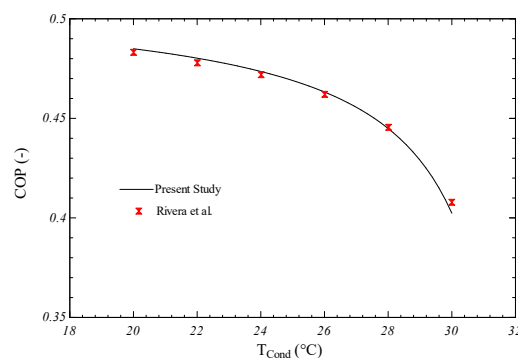
۵-۱- اعتبارسنجی

برای ارزیابی صحت مدل‌سازی، دو بخش چرخه رانکین آلی و مبدل گرمای جذبی با داده‌های مطالعات پیشین اعتبارسنجی شده‌اند. در گام نخست، نتایج مدل چرخه رانکین آلی در شرایط مشابه مطالعه یاری [۳۳] اجرا شد. مطابق جدول ۴، توان تولیدی و بازده‌های انرژی و انرژی چرخه از ۳٪ است که بیانگر دقت مناسب مدل‌سازی چرخه است. سپس عملکرد مبدل گرمای جذبی بر اساس ضریب عملکرد (COP) با نتایج ریورا و همکاران [۳۴] مقایسه شد. همان‌طور که شکل ۳ نشان می‌دهد، روند تغییرات COP با دمای خنک‌کننده کاملاً سازگار با داده‌های مرجع است و صحت مدل‌سازی این بخش را تأیید می‌کند. اختلافات جزئی مشاهده‌شده عمدتاً به تفاوت در فرضیات، خواص سیالات و شرایط مرزی مطالعات مرجع مربوط است و در محدوده

قابل قبول شبیه سازی قرار دارد.

جدول ۴- اعتبارسنجی مدل ارائه شده برای چرخه ی رانکین آبی با مطالعه ی یاری [۳۳].

پارامتر	این مطالعه	نوع سیال آبی		این مطالعه	این مطالعه
		<i>n - Pentane</i>	<i>R113</i>	<i>R123</i>	<i>R123</i>
$\dot{W}_{net}$ (kW)	48.57	48.02	47.87	46.7	50.28
η_I (%)	12.6	12.55	13.09	13.03	13.28
η_{II} (%)	46.8	46.7	47.82	47.68	49.06



شکل ۲- صحت سنجی مدل ارائه شده برای مبدل گرمای جذبی در این پژوهش با نتایج ریورا و همکاران [۳۴].

۲-۵- داده های فنی و تحلیل حالت پایه

به منظور بررسی اولیه عملکرد سه پیکربندی مختلف از سامانه ترکیبی، شاخص های انرژی، اگزرژی و اقتصادی برای هر حالت در شرایط پایه محاسبه شده و در جدول ۴ نشان داده شده اند. برای انجام این مقایسه، شرایط مرزی و پارامترهای کلیدی طراحی در تمامی پیکربندی ها به صورت یکسان لحاظ شده اند تا ارزیابی ها از نظر فنی قابل اتکا باشند. به طور مشخص، دمای جاذب ۱۳۰ درجه سلسیوس، دمای تبخیرکن و ژنراتور به ترتیب (۸۰-۹۰)، (۸۰-۹۰) و (۸۰-۹۰) درجه سلسیوس برای سه پیکربندی مختلف در نظر گرفته شده اند. همچنین، ضریب عملکرد گرمایی مبدل برابر ۰/۸، دمای چگالنده ۳۰ درجه سلسیوس و دمای ورودی سیال آبی به توربین برابر ۱۲۵ درجه سلسیوس لحاظ گردیده است.

در نگاه نخست، پیکربندی سوم با تولید بیش از ۲۰۰۰ کیلووات توان خالص، بیشترین ظرفیت تولید برق را در بین سه گزینه داراست. با این حال، بازده گرمایی کل سیستم در این پیکربندی حدود ۸/۸٪ است که نسبت به دو حالت دیگر کمتر بوده و نشان می دهد توان بیشتر با مصرف بیشتر انرژی از منبع زمین گرمایی حاصل شده است. همچنین، تخریب اگزرژی در بخش مبدل گرمای جذبی در این حالت بسیار بالا (۱۴۹۴ کیلووات) است، که می تواند ناشی از طراحی غیر بهینه یا شرایط عملیاتی خاص این بخش باشد. این در حالی است که بازده اگزرژی کلی سیستم همچنان در سطح نسبتاً مناسبی (۴۸/۶۶٪) باقی مانده است.

پیکربندی دوم، گرچه کمترین توان تولیدی را ارائه می دهد

(۱۰۶۶ کیلووات)، اما از نظر بازده گرمایی (۹/۸٪)، هزینه چرخه عمر (۱۰/۲۴ میلیون دلار) و تخریب اگزرژی کل (۵۴۶/۳ کیلووات) بهترین عملکرد را دارد. این پیکربندی از نظر اقتصادی جذاب تر است و می تواند برای پروژه هایی با محدودیت بودجه یا منابع انرژی، گزینه ای بهینه باشد.

در مقابل، پیکربندی اول عملکرد متعادلی بین دو گزینه دیگر ارائه می دهد. تخریب اگزرژی پایین در بخش مبدل گرمای جذبی (۲۸۱/۶ کیلووات) و توان تولیدی مناسب (۱۷۴۸ کیلووات) در کنار بازده های انرژی و اگزرژی قابل قبول، این پیکربندی را به گزینه ای با پایداری عملکرد و هزینه تبدیل کرده است. در ادامه، به منظور بررسی دقیق تر رفتار ترمودینامیکی و اقتصادی سیستم ها، مطالعه ی پارامتری بر روی پارامترهای کلیدی طراحی انجام می شود تا اثر تغییر شرایط کاری بر شاخص های عملکردی مورد تحلیل قرار گیرد و راهکارهای بهبود عملکرد استخراج گردد.

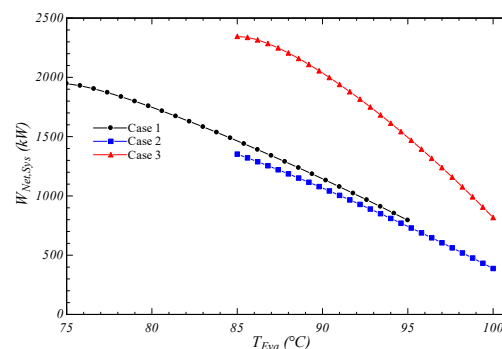
جدول ۵- نتایج بدست آمده برای سه پیکربندی پیشنهادی در حالت پایه

شاخص ها	Case 1	Case 2	Case 3
توان خالص سیستم (kW)	۱۷۴۸	۱۰۶۶	۲۰۳۷
بازده گرمایی کل سیستم (%)	۹/۲۱	۹/۸۲	۸/۸۸
بازده گرمایی ORC (%)	۱۶/۳۷	۱۶/۳۷	۱۶/۳۷
بازده اگزرژی کل سیستم (%)	۴۸/۵۶	۴۶/۷۷	۴۸/۶۶
بازده اگزرژی ORC (%)	۶۶/۸۹	۶۴/۴۵	۶۵/۳۵
تخریب اگزرژی (kW)	۵۲۴/۴	۳۶۷/۴	۵۶۹
تخریب اگزرژی AHT (kW)	۲۸۱/۶	۱۷۸/۹	۱۴۹۴
تخریب اگزرژی کل سیستم (kW)	۸۰۶	۵۴۶/۳	۲۰۶۳
هزینه چرخه عمر (میلیون دلار)	۱۱/۸	۱۰/۲	۱۲/۵
ضریب عملکرد مبدل گرما (COP)	۰/۴۹۷	۰/۴۹۶	۰/۴۸۶
بازده اگزرژی مبدل گرما (ECOP)	۰/۶۰۸	۰/۵۸۴	۰/۶۰۹

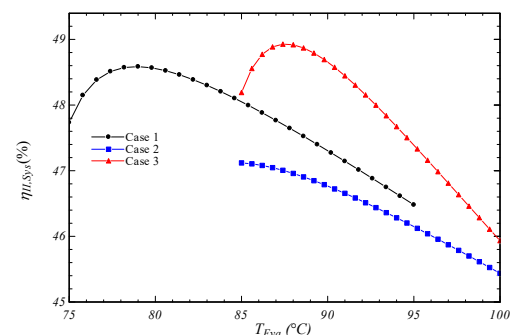
۳-۵- مطالعه پارامتری

تأثیر دمای تبخیرکن و ژنراتور بر عملکرد سیستم

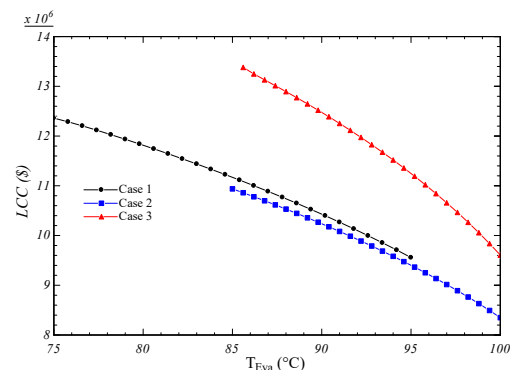
نتایج بررسی ها نشان می دهد که دمای تبخیرکن و ژنراتور تأثیر قابل توجهی بر عملکرد سیستم تولید توان زمین گرمایی دارند. همانطور که شکل ۳ نشان می دهد در هر سه پیکربندی پیشنهادی، زمانی که دمای تبخیرکن بیشتر از دمای ژنراتور باشد، توان تولیدی افزایش می یابد، زیرا مبدل گرمای در این شرایط عملکرد بهتری دارد. با این حال، افزایش هم زمان دمای تبخیرکن و ژنراتور منجر به کاهش توان تولیدی در هر سه حالت می شود، زیرا در این شرایط میزان گرمای جذب شده کاهش می یابد. همچنین شکل ۴ نشان می دهد که بازده اگزرژی در پیکربندی سوم بالاتر از دو حالت دیگر است، که نشان می دهد پیکربندی سوم علاوه بر تولید توان بیشتر، انرژی زمین گرمایی را نیز با کارایی بالاتری به برق تبدیل می کند. با این وجود، هزینه چرخه ی عمر در پیکربندی سوم بیشتر است (شکل ۵)، زیرا افزایش توان تولیدی به استفاده از یک توربین بزرگ تر نیاز دارد که منجر به افزایش هزینه های سرمایه گذاری می شود.



شکل ۳- تأثیر تغییرات دمای تبخیرکن و ژنراتور بر روی توان تولیدی خالص سیستم.



شکل ۴- تغییرات بازده سیستم در اثر تغییرات دمای تبخیرکن و ژنراتور.



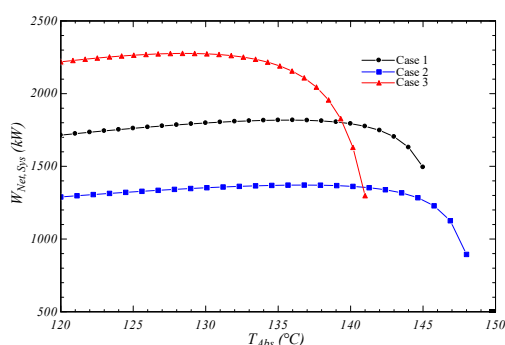
شکل ۵- اثر تغییرات دمای ژنراتور و تبخیرکن بر روی هزینه چرخه عمر سیستم.

تأثیر دمای جاذب بر عملکرد سیستم

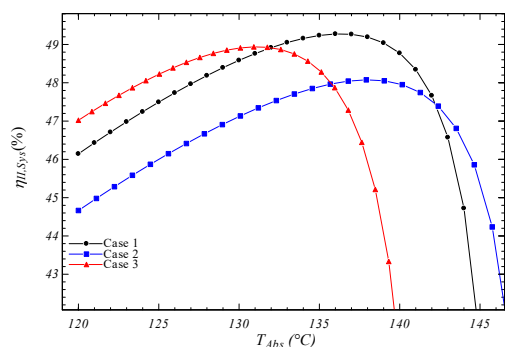
دمای جاذب یکی از عوامل کلیدی در عملکرد سیستم‌های پیشنهادی است، زیرا نقش تعیین‌کننده‌ای در توانایی مبدل گرما برای بهبود کیفیت گرما دماپایین دارد. همانطور که شکل ۶ نشان می‌دهد، در دماهای پایین‌تر (تا حدود ۱۴۰ درجه سلسیوس)، پیکربندی سوم بیشترین توان تولیدی را دارد.

در دماهای بالاتر، عملکرد دو پیکربندی دیگر بهبود یافته و می‌توانند از پیکربندی سوم پیشی بگیرند. با توجه به هدف این پژوهش که افزایش توان تولیدی است، پیکربندی سوم، باوجود محدودیت دمایی، همچنان گزینه‌ی بهتری محسوب می‌شود. همچنین با توجه به

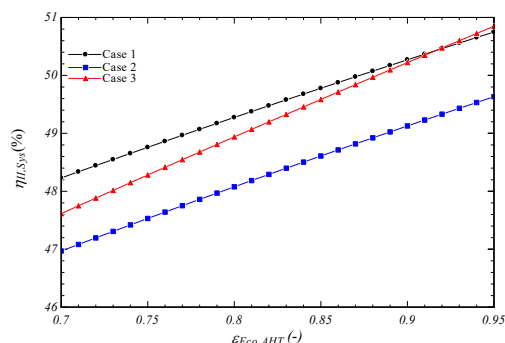
شکل ۷ افزایش دمای جاذب ابتدا بازده را افزایش داده و سپس پس از رسیدن به مقدار بهینه، کاهش می‌یابد. این روند نشان می‌دهد که دمای جاذب باید مقدار بهینه‌ای داشته باشد: دمای بیش‌ازحد پایین مانع بهبود کیفیت گرما می‌شود و دمای بیش‌ازحد بالا موجب اختلال در عملکرد اجزای سیستم و کاهش گرمای آزادشده در جاذب می‌شود. علاوه بر این شکل ۸ هزینه چرخه عمر سه سیستم را مقایسه می‌کند و نشان می‌دهد که هزینه سیستم‌ها مستقیماً به توان تولیدی آن‌ها وابسته است. از آنجاکه مقدار سیال زمین‌گرمایی ثابت فرض شده است، تغییرات توان تولیدی بزرگ‌ترین عامل در تغییر هزینه چرخه عمر سیستم محسوب می‌شود. در نهایت، بررسی‌ها نشان می‌دهد که پیکربندی سوم باوجود عملکرد بهتر، هزینه بیشتری دارد، زیرا توان تولیدی آن بالاتر است و هزینه‌ی نهایی سیستم به این عامل وابسته است.



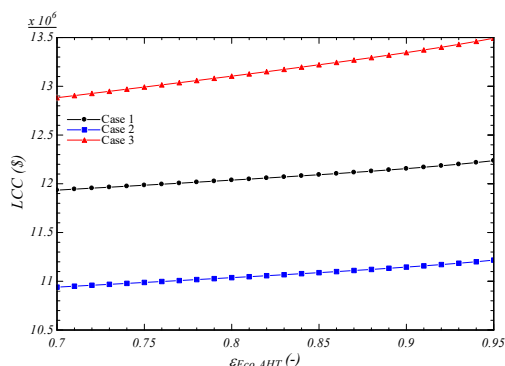
شکل ۶- تأثیر دمای جاذب مبدل گرما بر روی توان تولیدی سه سیستم پیشنهادی.



شکل ۷- تغییرات بازده قانون دوم سیستم‌های پیشنهادی در اثر تغییرات دمای جاذب.



شکل ۱۰- تغییرات بازده انرژی سیستم‌های پیشنهادی در اثر تغییرات ضریب عملکرد اکونومایزر مبدل گرما.



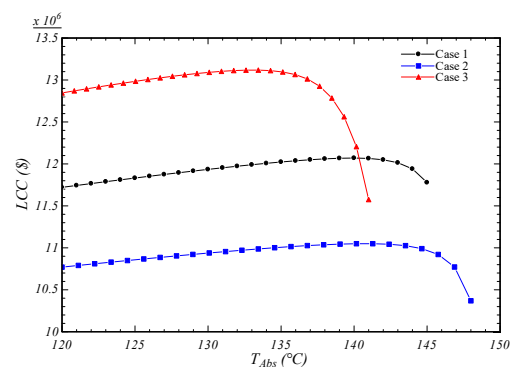
شکل ۱۱- هزینه چرخه عمر سه سیستم پیشنهادی در اثر افزایش ضریب عملکرد اکونومایزر مبدل گرما.

تأثیر دمای ورودی توربین بر عملکرد سیستم

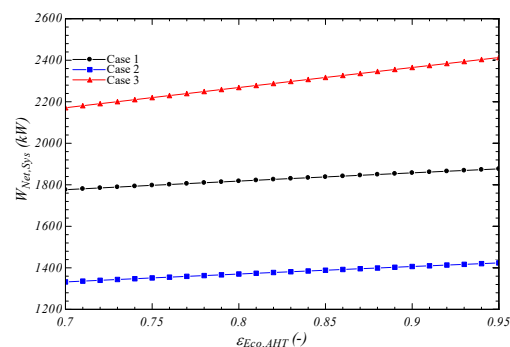
دمای ورودی توربین یکی از پارامترهای کلیدی در عملکرد سیستم پیشنهادی است. افزایش دمای ورودی توربین، فشار ورودی توربین را افزایش داده و توان تولیدی آن را بیشتر می‌کند. شکل ۱۲ نشان می‌دهد که افزایش دمای ورودی توربین باعث افزایش توان تولیدی در هر سه سیستم پیشنهادی می‌شود. از آنجا که گرمای ورودی به سیستم در جاذب ثابت است، افزایش توان تولیدی موجب افزایش بازده سیستم نیز می‌شود که این روند در شکل ۱۳ نمایش داده شده است. سیستم پیشنهادی در پیکربندی سوم بیشترین توان و بازده را نسبت به دو سیستم دیگر دارد. از همین رو، می‌توان پیش‌بینی کرد که هزینه چرخه عمر آن نیز بالاتر باشد. این موضوع در شکل ۱۴ کاملاً مشخص است.

باوجود بالاتر بودن هزینه چرخه عمر در حالت سوم، بررسی نسبت افزایش هزینه به افزایش توان تولیدی اهمیت دارد: توان تولیدی در حالت سوم نسبت به حالت اول و دوم به ترتیب ۲۹٪ و ۷۲٪ بیشتر است. درحالی‌که هزینه چرخه عمر در حالت سوم نسبت به حالت اول و دوم تنها ۱۱٪ و ۲۱٪ افزایش دارد.

بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که افزایش توان تولیدی در مقایسه با افزایش هزینه، کاملاً توجیه‌پذیر است و حالت سوم از نظر اقتصادی و ترمودینامیکی گزینه بهتری محسوب می‌شود.



شکل ۸- تأثیر دمای جاذب بر روی هزینه چرخه عمر سه سیستم پیشنهادی.



شکل ۹- تأثیر ضریب عملکرد اکونومایزر مبدل گرما بر روی توان تولیدی سیستم‌های پیشنهادی.

تأثیر ضریب عملکرد اکونومایزر بر سیستم

اکونومایزر در چرخه مبدل گرمای جذبی با بازیابی و استفاده مجدد از گرما، نقش مهمی در بهبود عملکرد سیستم دارد. این مبادله‌کن گرمایی باعث می‌شود که سیال خروجی از جاذب قبل از ورود به ژنراتور، گرمای خود را از دست داده و در دمای پایین‌تر برای جداسازی مبرد آماده شود و به طور هم‌زمان، سیال ورودی به جاذب گرم شود تا جذب مبرد در دمای بالاتر کارآمدتر انجام شود. شکل ۹ نشان می‌دهد که با افزایش ضریب عملکرد اکونومایزر، توان تولیدی هر سه سیستم پیشنهادی افزایش می‌یابد. همچنین تحت شرایط بررسی شده، پیکربندی سوم همچنان بیشترین توان تولیدی را دارد.

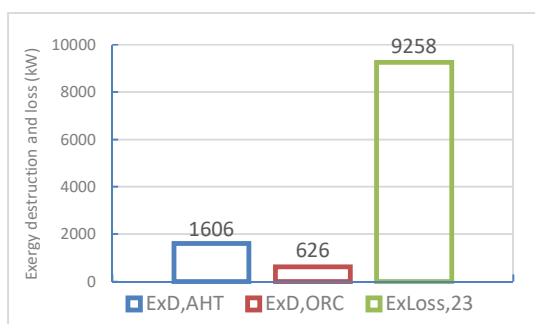
شکل ۱۰ نشان می‌دهد که افزایش بازده سیستم مستقیماً با بهبود عملکرد اکونومایزر مرتبط است. در پیکربندی سوم، این افزایش با شیب بیشتری نسبت به دو حالت دیگر رخ می‌دهد. در ضرایب عملکرد پایین، پیکربندی اول بازده بیشتری دارد با این حال با افزایش ضریب عملکرد اکونومایزر، بازده پیکربندی سوم از دو حالت دیگر فراتر می‌رود.

شکل ۱۱ نشان می‌دهد که افزایش ضریب عملکرد اکونومایزر منجر به افزایش هزینه چرخه عمر سیستم می‌شود. بااین‌حال، این افزایش هزینه عمدتاً ناشی از افزایش توان تولیدی است، زیرا هزینه اکونومایزر در مقایسه با هزینه حف‌ر چاه و توربین ناچیز است.

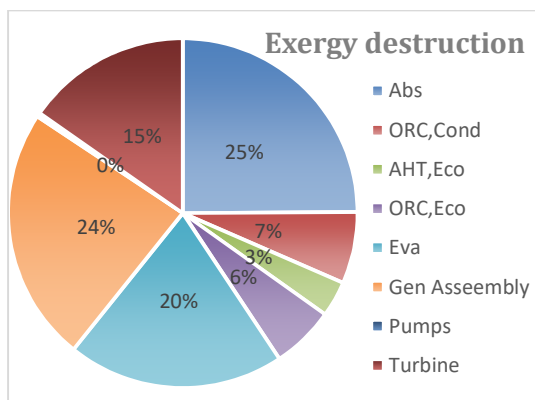
در مجموع از آنجا که افزایش توان و بازده سیستم تأثیر بسزایی در عملکرد کلی دارد، بهتر است که ضریب عملکرد اکونومایزر از ۰/۹ کمتر نباشد تا بهترین بازده و توان تولیدی حاصل شود.

از آن برای تولید توان بیشتر را تقریباً غیرممکن می‌کند. با این حال، برای بهبود عملکرد کلی سیستم، می‌توان تمهیداتی برای بهره‌برداری از این منبع گرمایی در نظر گرفت تا از هدررفت انرژی جلوگیری شود. همچنین مقدار انرژی ناپوشیده در چرخه‌ی مبدل گرمای جذبی بیش از دو برابر چرخه‌ی رانکین آلی است. شکل ۱۶ منابع نابودی انرژی در این دو چرخه را به تفکیک اجزا نمایش می‌دهد. در چرخه‌ی مبدل گرمای جذبی، تبخیرکن، جاذب و مجموعه‌ی ژنراتور بیشترین سهم نابودی انرژی را دارند. این سه بخش مجموعاً حدود ۷۰٪ از کل انرژی ناپوشیده را به خود اختصاص می‌دهند.

برای کاهش نابودی انرژی و بهبود عملکرد سیستم پیشنهادی، باید بر بهینه‌سازی عملکرد تبخیرکن، جاذب و ژنراتور تمرکز شود. همچنین، استفاده‌ی بهینه از گرمای بازگشتی به منبع زمین‌گرمایی می‌تواند کارایی کلی سیستم را افزایش دهد.



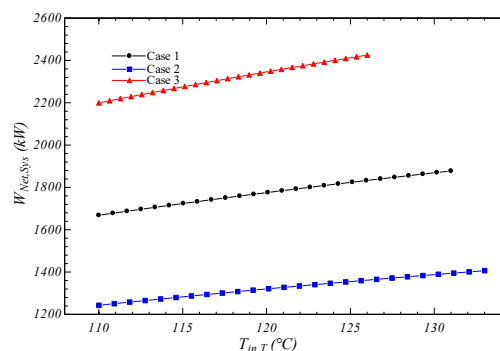
شکل ۱۵- انرژی از دست رفته در نقطه‌ی تزریق به چاه و انرژی ناپوشیده در چرخه‌های مبدل جذبی و رانکین آلی.



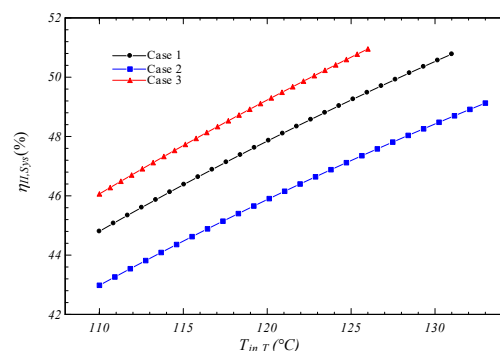
شکل ۱۶- سهم هر یک از اجزای سیستم در نابودی انرژی.

شکل ۱۷ هزینه‌ی سه بخش اصلی سیستم پیشنهادی را مقایسه می‌کند: چاه زمین‌گرمایی، چرخه‌ی مبدل گرمای جذبی و چرخه‌ی رانکین آلی.

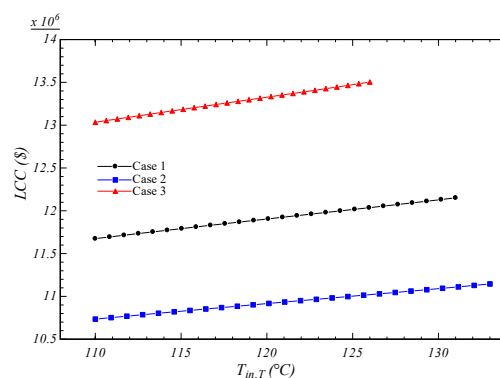
نتایج نشان می‌دهد که هزینه‌ی مبدل گرمای جذبی تقریباً یک‌پنجم هزینه‌ی حفر چاه و چرخه‌ی رانکین آلی است. بیش از ۵۰٪ هزینه‌ی چرخه‌ی رانکین آلی به توربین بخار آن مربوط می‌شود، که کاهش این هزینه دشوار به نظر می‌رسد. حفر چاه زمین‌گرمایی یکی از هزینه‌های اساسی سیستم است و برای کاهش آن باید راهکارهایی در نظر گرفته شود. در این مطالعه، عمق چاه زمین‌گرمایی ۱۰۰۰ متر در



شکل ۱۲- تاثیر دمای ورودی توربین بر روی توان تولیدی خالص سیستم‌های پیشنهادی.



شکل ۱۳- تغییرات بازده انرژی سیستم‌های پیشنهادی در اثر افزایش دمای ورودی توربین.



شکل ۱۴- هزینه‌ی چرخه‌ی عمر سه سیستم پیشنهادی در اثر افزایش دمای ورودی توربین.

۴-۵- نتایج کلی

بر اساس نتایج مطالعه‌ی پارامتری، پیکربندی سوم در بیشتر سناریوهای بررسی‌شده، عملکرد ترمودینامیکی بهتری نسبت به دو حالت دیگر دارد. با وجود هزینه‌ی بالاتر در حالت سوم، عملکرد برتر آن این افزایش هزینه را توجیه‌پذیر می‌کند. بنابراین، در این بخش، حالت سوم به‌عنوان گزینه‌ی نهایی سیستم پیشنهادی انتخاب شده و عوامل اصلی بازگشت‌ناپذیری و منابع هزینه در این سیستم بررسی می‌شوند.

شکل ۱۵ نشان می‌دهد که بخش قابل‌توجهی از انرژی استخراج‌شده از منبع زمین‌گرمایی بدون استفاده به منبع بازگردانده می‌شود. دمای این جریان حدود ۶۷ درجه سلسیوس است که استفاده

جدول ۶- مقادیر نهایی به دست آمده برای پارامترهای ارزیابی عملکرد

سیستم در پیکربندی سوم.	
نام پارامتر	مقدار نهایی بدست آمده
بازده انرژی سیستم	۸/۸۳ درصد
بازده انرژی سیستم	۵۱/۲ درصد
توان تولیدی خالص سیستم	۲۵۰۱ کیلووات
توان خالص تولیدی ORC	۲۵۰۳ کیلووات
بازده انرژی ORC	۱۶/۶۴ درصد
بازده انرژی ORC	۶۵/۵۴ درصد
ضریب عملکرد AHT	۰/۴۹۴
ضریب عملکرد انرژی ORC	۰/۶۴
انرژی ناپودی سیستم	۲۲۷۸ کیلووات
هزینه ی چرخه ی عمر سیستم	۱۴/۳۷ میلیون دلار

۷- فهرست علائم

نمادها	
$\dot{E}x$	آهنگ انرژی (kW)
h	آنتالپی مخصوص (kJ/kg)
$\dot{m}$	دبی جرمی سیال (kg/s)
P	فشار (kPa)
T	دما (°C)
s	آنتروپی مخصوص (kJ/kg·K)
$\dot{W}$	توان (kW)
$CEPCI$	شاخص هزینه مهندسی شیمی (-)
LCC	هزینه چرخه عمر (\$)
$\dot{Q}$	آهنگ انتقال گرما (kW)
X	غلظت محلول LiBr-H ₂ O
Z	هزینه تجهیزات (\$)

علائم یونانی

η_I	بازده انرژی (-)
η_{II}	بازده انرژی (-)
ε	ضریب عملکرد مبادله کننده گرمایی (-)

زیرنویسها

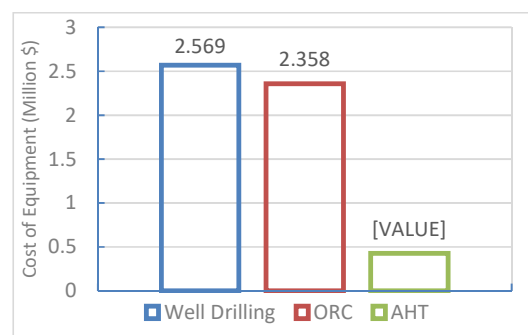
Abs	جاذب (Absorber)
Cond	چگالنده
Eva	تبخیرکن (Evaporator)
Gen	ژنراتور (Generator)
Sys	کل سامانه ترکیبی
ORC	چرخه رانکین آلی
AHT	مبدل گرمای جذبی
G	منبع زمین گرمایی
P	پمپ (Pump)
RP	پمپ سیال مبرد (Refrigerant Pump)
SP	پمپ محلول (Solution Pump)
T	توربین (Turbine)

۸- مراجع

[۱] عبدالعلی پورعدل م، مهران، رستمی، آریا، یاری. تحلیل انرژی و انرژی یک سیستم بر مبنای انرژی زمین گرمایی برای تولید همزمان توان، آب

نظر گرفته شده است، اما برای دستیابی به دمای ۱۱۰ درجه سلسیوس می توان از منابع سطحی تر بهره برد. این اقدام می تواند هزینه های نهایی سیستم را به طور چشمگیری کاهش دهد.

در مجموع، سیستم پیشنهادی عملکرد مناسبی در استخراج و تبدیل گرمای دمایی به توان الکتریکی ارائه می دهد. اگرچه بازده انرژی سیستم پایین به نظر می رسد، اما تحلیل بازده انرژی نشان می دهد که این سیستم ترکیبی قادر است بخش قابل توجهی از قابلیت تولید توان منبع زمین گرمایی را به الکتریسیته تبدیل کند. نتایج عددی مربوط به بازده انرژی، بازده انرژی، ضرایب عملکرد مبدل گرمای جذبی و هزینه ی سیستم در جدول ۴ ارائه شده است.



شکل ۱۷- هزینه ی خرید دستگاه ها و حفر چاه زمین گرمایی بر حسب دلار.

۶- نتیجه گیری

در این پژوهش، سیستم ترکیبی شامل چرخه های مبدل گرمای جذبی و رانکین آلی برای تولید توان الکتریکی از منابع زمین گرمایی دما پایین مورد بررسی قرار گرفت.

- این سیستم با هزینه ی چرخه عمر ۱۴/۳۷ میلیون دلار قادر است ۲/۵ مگاوات توان پایدار را از یک چاه زمین گرمایی به عمق ۱۰۰۰ متر تولید کند.
- بازده انرژی و انرژی سیستم به ترتیب ۸/۸۳٪ و ۵۱/۲٪ محاسبه شد.
- تحلیل پارامتری نشان داد که دمای تبخیرکن، ژنراتور، جاذب و دمای ورودی توربین تأثیر قابل توجهی بر عملکرد سیستم دارند.
- ضریب عملکرد اکونومایزر نقش مهمی در بهبود بازده سیستم ایفا می کند.
- بخش عمده ای از انرژی منبع زمین گرمایی بدون استفاده مجدداً به چاه بازگردانده می شود، که نشان دهنده ی پتانسیل بهبود در بهره برداری از این انرژی است.
- از نظر اقتصادی، حفر چاه زمین گرمایی و توربین بخار بیشترین سهم هزینه ها را به خود اختصاص می دهند.
- در مجموع می توان نتیجه گرفت که سیستم ترکیبی پیشنهادی پتانسیل بالایی برای بهره برداری مؤثر از منابع زمین گرمایی دما پایین و تولید برق پایدار دارد. با این حال، طراحی و اجرای دقیق آن با توجه به حساسیت به پارامترهای مختلف، برای دستیابی به عملکرد بهینه ضروری است.

- [19] Liu F, Sui J, Liu T, Jin H. Performance investigation of a combined heat pump transformer operating with water/lithium bromide. *Energy Convers Manag* 2017;140:295–306.
- [20] Bellos E, Arabkoohsar A, Lykas P, Sammouris C, Kitsopoulou A, Tzivanidis C. Investigation of a solar-driven absorption heat transformer with various collector types for industrial process heating. *Appl Therm Eng* 2024;244:122665.
- [21] Mehrjouee H, Fallah M, Mohammad S. Advanced exergy analysis of a double absorption heat transformer recovering industrial waste heat for pure water production. *Therm Sci Eng Prog* 2024;47:102242.
- [22] Beniwal R, Garg K, Tyagi H. Thermodynamics analysis of a novel absorption heat transformer-driven combined refrigeration and desalination system. *Energy Convers Manag* 2023;277:116597.
- [23] Nematzadeh N, Ghaebi H, Abdi Aghdam E. Thermo-Economic Analysis of Innovative Integrated Power Cycles for Low-Temperature Heat Sources Based on Heat Transformer. *Sustain* 2022;14.
- [24] Yari M, Salehi S, Mahmoudi SMS. Three-objective optimization of water desalination systems based on the double-stage absorption heat transformers. *Desalination*.
- [25] Arslan M, Yilmaz C. Development of models for green hydrogen production of Turkey geothermal Resources: A case study demonstration of thermodynamics and thermoeconomics analyses. *Fuel* 2024;359.
- [26] Ghiasirad H, Asgari N, Khoshbakhti Saray R, Mirmasoumi S. Thermoeconomic assessment of a geothermal based combined cooling, heating, and power system, integrated with a humidification-dehumidification desalination unit and an absorption heat transformer. *Energy Convers Manag* 2021;235:113969.
- [27] Abdolalipouradi M, Mohammadkhani F, Khalilarya S. A comparative analysis of novel combined flash-binary cycles for Sabalan geothermal wells: Thermodynamic and exergoeconomic viewpoints. *Energy* 2020;209.
- [28] Abdolalipouradi M, Mousavi V, Mohammadkhani F, Yari M. Proposing new configurations of flash cycle for effective utilization of geothermal resources: thermodynamic and exergoeconomic assessments. *J Brazilian Soc Mech Sci Eng* 2022;44.
- [۲۹] پورعدل ع، مهران، آریا، خ، مدار ج. تحلیل اگزورزی چرخه‌ی ترکیبی پیشنهادی دی‌اکسید کربن فوق بحرانی و رانکین آلی از منبع زمین گرمایی سیلان. *مهندسی مکانیک مدرس* ۲۰۱۸؛۱۱:۱۸-۲۲.
- [30] Palacios-Bereche R, Gonzales R, Nebra SA. Exergy calculation of lithium bromide-water solution and its application in the exergetic evaluation of absorption refrigeration systems LiBr-H₂O. *Int J Energy Res* 2012;36:166–81.
- [31] Duffie JA, Beckman WA, Blair N. Solar engineering of thermal processes, photovoltaics and wind. vol. 53. 2020.
- [32] Hackstein F V., Madlener R. Sustainable operation of geothermal power plants: why economics matters. *Geotherm Energy* 2021;9.
- [33] Yari M. Exergetic analysis of various types of geothermal power plants. *Renew Energy* 2010;35:112–21.
- [34] Rivera W, Cerezo J, Rivero R, Cervantes J, Best R. Single stage and double absorption heat transformers used to recover energy in a distillation column of butane and pentane. *Int J Energy Res* 2003;27:1279–92.
- شیرین، گرمایش و هیدروژن. *مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز* ۴۴-۵۱:۱۳۵؛۲۰۲۱.
- [2] Shokati N, Ranjbar F, Yari M. Exergoeconomic analysis and optimization of basic, dual-pressure and dual-fluid ORCs and Kalina geothermal power plants: A comparative study. *Renew Energy* 2015;83:527–42.
- [3] Allahvirdizadeh P. A review on geothermal wells: Well integrity issues. *J Clean Prod* 2020;275:124009.
- [4] Hamlehdar M, Beardsmore G, Narsilio GA. Hydrogen production from low-temperature geothermal energy – A review of opportunities, challenges, and mitigating solutions. *Int J Hydrogen Energy* 2024;77:742–68.
- [5] Gemelli A, Mancini Adriano A, Longhi S. GIS-based energy-economic model of low temperature geothermal resources: A case study in the Italian Marche region. *Renew Energy* 2011;36:2474–83.
- [۶] اعزازی س، سازنگ، آریا، خ، جعفرمدار. تحلیل ترمودینامیکی و ارزیابی مقایسه‌ای طرح‌های پیشنهادی چرخه ترنسفورمر گرمایی دوجذبی در فرآیند تبخیر آب برای شیرین‌سازی آن. *مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز* ۲۰۰۵-۵۰:۱۱؛۲۰۲۱.
- [7] Ramazankhani ME, Mostafaeipour A, Hosseiniinasab H, Fakhrazad MB. Feasibility of geothermal power assisted hydrogen production in Iran. *Int J Hydrogen Energy* 2016;41:18351–69..
- [8] Anderson BJ. Analysis of Low-Temperature Utilization of Geothermal Resources • Timeline • Budget • Barriers • Partners : West Virginia University , Cornell University , Iowa 2010:1–15.
- [9] Van Erdeweghe S, Van Bael J, Laenen B, D'haeseleer W. Feasibility study of a low-temperature geothermal power plant for multiple economic scenarios. *Energy* 2018;155:1004–12.
- [10] Ambriz-Díaz VM, Rubio-Maya C, Chávez O, Ruiz-Casanova E, Pastor-Martínez E. Thermodynamic performance and economic feasibility of Kalina, Goswami and Organic Rankine Cycles coupled to a polygeneration plant using geothermal energy of low-grade temperature. *Energy Convers Manag* 2021;243..
- [11] Hu B, Guo J, Yang Y, Shao Y. Optimization of low temperature geothermal organic Rankine power generation system. *Energy Reports* 2022;8:129–38.
- [12] Cao J, Zheng L, Zheng Z, Peng J, Hu M, Wang Q, et al. Recent progress in organic Rankine cycle targeting utilisation of ultra-low-temperature heat towards carbon neutrality. *Appl Therm Eng* 2023;231.
- [13] Rivera W, Martínez H, Cerezo J, Romero RJ, Cardoso MJ. Exergy analysis of an experimental single-stage heat transformer operating with single water/lithium bromide and using additives (1-octanol and 2-ethyl-1-hexanol). *Appl Therm Eng* 2011;31:3526–32.
- [14] Liu F, Sui J, Liu T, Jin H. Energy and exergy analysis in typical days of a steam generation system with gas boiler hybrid solar-assisted absorption heat transformer. *Appl Therm Eng* 2017;115:715–25.
- [15] Fu W, Niu C, Li T, Zhu J. Simulation and Parametric Study on Kalina Cycle Coupled Absorption Heat Transformer. *World Geotherm Congr* 2015 2015;19:11.
- [16] Behnam P, Arefi A, Shafii MB. Exergetic and thermoeconomic analysis of a trigeneration system producing electricity, hot water, and fresh water driven by low-temperature geothermal sources. *Energy Convers Manag* 2018;157:266–76.
- [17] Zare V, Mahmoudi SMS, Yari M, Amidpour M. Thermoeconomic analysis and optimization of an ammonia-water power/cooling cogeneration cycle. *Energy* 2012;47:271–83.
- [18] Wang L, Bu X, Wang H, Ma Z, Ma W, Li H. Thermoeconomic evaluation and optimization of LiBr-H₂O double absorption heat transformer driven by flat plate collector. *Energy Convers Manag* 2018;162:66–76.